سال سی و دوم، شمارهٔ دو، ۱۴۰۰(۴۳- ۶۰)
DOI: 10.22067/jacsm.2021.67752.1018

اثر پارامتر گام بر کرنش و تنش فرایند گنبدی‌کردن انتهای لوله (اسپینینگ) در ساخت مخزن CNG آلومینیمی*

مقاله پژوهشی

محمد صدیقی[۱] کمال‌الدین ناصری‌نژاد[۲]

چکیده *مخازن CNG آلومینیمی تقویت‌شده می‌توانند با کاهش وزن و مصرف سوخت خودرو نسبت به مخازن فولادی مزیت ویژه‌ای را ایجاد کنند. گنبدی‌کردن انتهای لوله (اسپینینگ) مرحله‌ای مهم در تولید مخزن CNG بدون درز است. هدف از انجام پژوهش حاضر، شبیه‌سازی انجام این فرایند روی لولهٔ آلومینیمی 6061-O در دمای بالا، بررسی اثر گام بر کرنش و تنش پس از انجام گذر اول و همچنین اثر آن بر کل فرایند است. پس از شبیه‌سازی کل فرایند و به‌دست‌آوردن شکل نهایی گنبد، در راستای بررسی اثر گام بر کرنش، کرنش‌های محیطی، محوری و در راستای ضخامت لوله پس از گذر اول، روی مسیرهای مختلف داخلی، میانی و خارجی در کردارهایی گزارش شده است. تغییرات گام، اثر قابل توجهی بر کم‌شدن شیب افزایش قدر مطلق کرنش محیطی، وجود کرنش محوری مثبت در مسیر داخلی و توزیع کرنش در مسیر میانی ندارد. اثر عمدهٔ افزایش گام در دیگر کرنش‌های مورد بررسی، یکنواخت‌ترشدن توزیع آن‌هاست. این اثر مطابق با پایداری بیشتر و اعوجاج کمتر در انجام کل فرایند با گام‌های بیشتر است. این پایداری در گذر بالاتر به‌ازای گام‌های مختلف نیز مشاهده شده است. از جهت تنش، تنش پس از برداشتن بار گذر اول به‌ازای گام‌های مختلف بررسی شده است. افزایش گام باعث کاهش بیشینه تنش موجود در لوله پس از جداشدن غلتک از آن بعد از گذر اول می‌شود.*

واژه‌های کلیدی اسپینینگ، خم‌کاری چرخشی، گنبدی‌کردن انتهای لوله، مخزن بدون درز آلومینیمی، گام.

مقدمه

استفاده‌نکردن از اتصالات در ساخت یک مخزن و یا به‌عبارت دیگر ساخت یک مخزن بدون درز می‌تواند کیفیت بهتری نسبت به مخزنی که در آن از اتصالاتی مانند جوش استفاده شده است، به وجود آورد. یکی از کاربردهای مهم و گستردهٔ مخازن بدون درز، ذخیرهٔ گاز طبیعی به‌عنوان سوخت خودرو (مخزن CNG) است. این مخازن را می‌توان از فولاد یا آلومینیم ساخت. استفاده از فولاد با وجود ایجاد استحکام بیشتر، باعث وزن بالای مخزن و آسیب‌پذیری آن در برابر خوردگی می‌شود. از طرف دیگر، استفاده از آلومینیم باعث کاهش وزن مخزن و درنتیجه کاهش مصرف سوخت و همچنین مقاومت بیشتر در برابر خوردگی خواهد بود. کم‌بودن مصرف سوخت از جهت افزایش قیمت آن امری مهم برای سازندگان و خریداران خودروهاست. از طرفی آلومینیم نسبت به فولاد از استحکام کمتری برخوردار است اما این کاهش نسبی استحکام را می‌توان با اضافه‌کردن تقویت‌کننده‌ای مانند کامپوزیت جبران کرد.

در یکی از روش‌های ساخت مخزن بدون درز، ابتدا با انجام فرایند کشش عمیق روی یک ورق، قطعه‌ای شبیه به یک لیوان تولید می‌شود. انتهای باز این لیوان که به‌نوعی یک لوله به حساب می‌آید، با فرایندی شبیه به کوزه‌گری که به آن در مقالهٔ حاضر گنبدی‌کردن گفته می‌شود، به شکل یک گنبد درمی‌آید. در واقع فرایند

* تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۹/۹/۲۳ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۰/۴/۸ می‌باشد.
(۱) استاد، دانشکدهٔ مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران
(۲) نویسندهٔ مسئول: کارشناسی‌ارشد، دانشکدهٔ مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران
Email: k_naserinejad@alumni.iust.ac.ir

گنبدی‌کردن انتهای لوله یکی از انواع روش شکل‌دهی چرخشی یا همان اسپینینگ است که در آن از ماندرل استفاده نمی‌شود. در گنبدی‌کردن انتهای لوله که شکل‌دهی در آن با یک یا چند غلتک انجام می‌شود، محل نصب شیر مخزن را نیز می‌توان در گنبد تعبیه کرد.

یکی از پارامترهای مهم گنبدی‌کردن انتهای لوله، پارامتر گام است. منظور از گام، میزان پیشروی غلتک روی مسیر شکل‌دهی به‌ازای هر دور از دوران لوله است. پژوهش‌های زیادی دربارۀ بررسی اثر پارامتر گام در فرایند گنبدی‌کردن انجام نگرفته است. از نگاهی کلی‌تر، پژوهش‌هایی که روی فرایند گنبدی‌کردن انتهای لوله صورت گرفته‌اند، نسبتا کم‌تعدادند. این موضوع شاید از آن جهت باشد که مخازن CNG عمدتا به‌صورت تجربی و سعی و خطا ساخته شده‌اند [1]. ازجمله پژوهش‌های صورت‌گرفته جهت بررسی اثرات پارامتر گام در گنبدی‌کردن انتهای لوله، پژوهش هانگ و همکاران [2] است. ایشان در پژوهش خود که در آن به گنبدی‌کردن انتهای باز یک لیوان فولادی کوچک پرداخته‌اند و اثر سرعت حرکت انتقالی غلتک روی زاویۀ پیچش و دایره‌ای‌بودن لولۀ شکل‌دهی‌شده را بررسی کرده‌اند. ذوقی و همکاران [3] با جزئیات بیشتری به بررسی اثرات پارامتر گام پرداخته‌اند. در پژوهش ایشان اثر این پارامتر روی کرنش و تنش پسماند، در گنبدی‌کردن انتهای یک لولۀ فولادی بررسی شده است. ژیونگ و همکاران [4] به بررسی اثر گام و همچنین بررسی تغییر شکل و توزیع تنش در شکل‌دهی محل نصب شیر مخزن از جنس آلومینیم ۶۰۶۱ پرداخته‌اند. در یکی از آخرین پژوهش‌های انجام‌شده در زمینۀ خم‌کاری چرخشی بدون ماندرل که روشی متفاوت از روش گنبدی‌کردن انتهای لوله به کار گرفته، در این پژوهش حاضر است.، لین و همکاران [5] اثر گام را روی دقت ایجاد شکل نهایی بررسی کرده‌اند. در پژوهش جدید دیگر [6] که در زمینۀ اسپینینگ انجام شده است، اثر گام روی ریزساختار مورد توجه است. در این پژوهش نخست روش فرایند متفاوت از روش مقاله حاضر است و دوم جنس لوله آلومینیم نیست.

پارامتر گام در دیگر انواع شکل‌دهی چرخشی نیز مورد توجه بوده است. جیانگو و ماکوتو [7-9] در پژوهش‌های خود به بررسی اثر پارامتر گام در فرایند اسپینینگ انجام‌شده روی یک لولۀ آلومینیمی پرداخته‌اند. در این پژوهش‌ها قسمتی از لوله با استفاده از ۲غلتک به شکل یک مخروط ناقص درمی‌آید. چن و همکاران [10] به بررسی اثر گام بر کیفیت سطح محصول فرایند اسپینینگ برشی (Shear Spinning) پرداخته و توانسته‌اند به سطحی با کیفیت پرداخت بالا دست یابند. ژان و همکاران [11] اثر پارامتر گام روی نیرو و کیفیت شکل‌دهی را مورد توجه قرار داده‌اند. در این پژوهش که در آن از یک ورق یک مخروط ناقص با یک انتهای بسته ساخته می‌شود، از ۲غلتک استفاده شده است. وانگ و همکاران [12] اثر گام روی ایجاد چروک را در فرایند اسپینینگ معمولی (Conventional Spinning) بررسی کرده‌اند. جیان و همکاران [13] اثر تغییر گام را روی تنش در اسپینینگ استوانۀ آلومینیمی 2A12 بررسی کرده‌اند. در ٤پژوهش اخیر از ماندرل استفاده شده است.

در یک نگاه کلی، پژوهش‌های متعددی روی انواع فرایندهای خم‌کاری چرخشی و پژوهش‌های محدودی روی گنبدی‌کردن انتهای لوله انجام شده است. اما در این میان بررسی اثر گام در گنبدی‌کردن انتهای لولۀ آلومینیمی 6061-O که فرایندی با استفاده از یک غلتک و بدون استفاده از ماندرل است در جست‌وجوهای نگارنده یافت نشده است. برخی پژوهش‌های اخیر [14-17] روی انجام فرایندی مشابه و بدون ماندرل بر لوله از جنس آلیاژ آلومینیمی صورت گرفته‌اند. اما در هیچ یک پارامتر گام بررسی نشده است. در [18] اثر گام بررسی

شده است اما جنس لولهٔ آلومینیم خالص ۱۰۷۰ است. لازم به ذکر است در مقالهٔ قبلی [۱۹] نویسندگان مقالهٔ حاضر، به اثر پارامتر گام به‌عنوان یکی از پارامترهای فرایند، به‌شکل بسیار کوتاه‌تری پرداخته شده است.

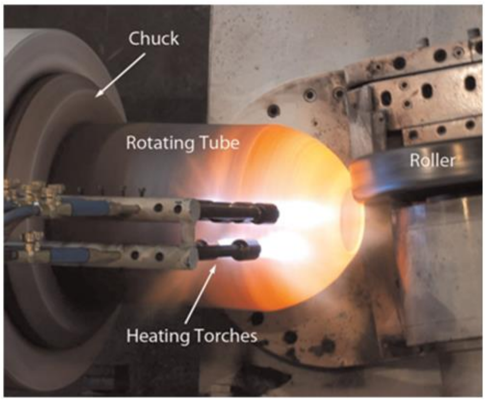
در این مقاله با استفاده از نرم‌افزار آباکوس به شبیه‌سازی گنبدی‌کردن انتهای یک لولهٔ آلومینیمی 6061-O، ارائه سطح مقطع شکل نهایی گنبد و بررسی مبسوط اثر پارامتر گام پس از انجام گذر اول پرداخته می‌شود. در این راستا با استفاده از نتایج شبیه‌سازی، کرنش‌های موجود در سطح مقطع لوله پس از گذر اول و اثرات گام بر آن در ۳مسیر داخلی، میانی و خارجی بررسی و تفسیر می‌شود. همچنین اثر گام بر کرنش معادل و بر کل فرایند شکل‌دهی مورد توجه قرار می‌گیرد. بررسی اثر گام بر تنش موجود در قطعه پس از جداشدن غلتک در گذر اول نیز از مواردی است که در پژوهش حاضر به آن پرداخته می‌شود.

فرایند عملی و شبیه‌سازی

شرح روش شکل‌دهی گنبدی‌کردن انتهای لوله، مقدمه‌ای بر توضیح شبیه‌سازی انجام‌شده در پژوهش حاضر است. با ارائهٔ این مقدمه در ادامه به شبیه‌سازی فرایند مذکور پرداخته می‌شود.

گنبدی‌کردن انتهای لوله. در این روش شکل‌دهی، انتهای باز قطعه‌ای شبیه به یک لیوان که از فرایند کشش عمیق حاصل شده است با حرکات رفت و برگشتی یک غلتک به شکل یک گنبد درمی‌آید. به هر یک از حرکات شکل‌دهی انجام‌شده با غلتک که از محیط لوله به‌سمت مرکز لوله انجام می‌شود، یک گذر (pass) می‌گویند.

از آن‌جایی که شکل‌دهی روی انتهای باز لیوان مذکور انجام می‌شود، ناحیهٔ درحال شکل‌دهی یک لوله در نظر گرفته می‌شود. بنابراین به این روش شکل‌دهی، گنبدی‌کردن انتهای لوله گفته شده است. لوله در حین انجام این فرایند درحال دوران است. در این فرایند، یک سر لوله درون سه‌نظام کاملا مقید شده است و شکل‌دهی روی سر دیگر لوله انجام می‌شود. به این نواحی به‌ترتیب سر گیردار و سر آزاد لوله گفته می‌شود. از طرفی، باتوجه‌به تغییر شکل زیاد ایجادشده و همچنین باتوجه‌به جنس ماده، در بعضی موارد، دمای لولهٔ درحال دوران از طریق مشعل‌هایی بالا نگه داشته می‌شود. شکل (۱) نمایی از فرایند عملی گنبدی‌کردن انتهای لوله را نشان می‌دهد.



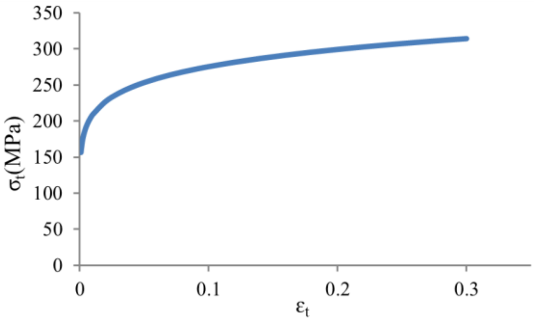
شکل ۱ فرایند گنبدی‌کردن انتهای لوله [20]

ورودی‌ها و موارد مربوط به شبیه‌سازی. یکی از ورودی‌های شبیه‌سازی، خواص ماده است. در پژوهش آکوس و کاواهارا [21] که روی بررسی تجربی و تحلیلی گنبدی‌کردن انتهای لولهٔ آلومینیم 6061-O متمرکز است، لوله تا دمای حدود ۱۸۰درجهٔ سلسیوس گرم شده است. در پژوهش حاضر، برای شبیه‌سازی خواص لوله‌ای از جنس آلومینیم ٦٠٦١ که تا دمای ۲۰۰درجهٔ سلسیوس حرارت داده شده است، مورد استفاده قرار می‌گیرد و فرض می‌شود که مشعل‌هایی دما را در طول فرایند شکل‌دهی ثابت نگه می‌دارند. در مراجع مختلفی دما در

شبیه‌سازی ثابت در نظر گرفته شده است که از جمله می‌توان [22-24] را نام برد. خواص لوله مذکور در جدول (۱) و شکل (۲) آورده شده است.

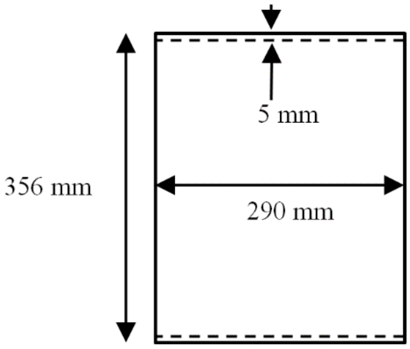
جدول ۱ خواص آلومینیم ٦٠٦١ [27]

پارامتر	مدول الاستیسیته	چگالی	ضریب پواسن
مقدار	٦٩ GPa	۲۷۰۰kg/m³	۰/۱۲٥



شکل ۲ کردار تنش- کرنش آلومینیم ٦٠٦١، به‌دست‌آمده از آزمون بالج در دمای ۲۰۰درجهٔ سلسیوس و نرخ کرنش ۰/۰۱۳برثانیه [28]

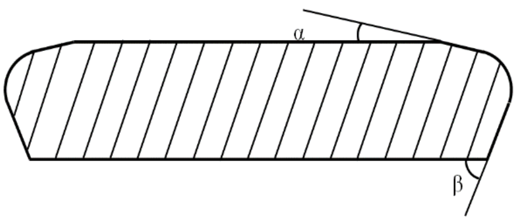
باتوجه‌به درنظرگرفتن جنبه‌های عملی و صنعتی فرایند در پژوهش حاضر، قطر لولهٔ مورد استفاده در شبیه‌سازی، بر اساس قطر یک مخزن تولیدشده در داخل کشور [۲٥] مقدار ۳٥٦میلی‌متر انتخاب شده است (شکل ۳). ضخامت لوله بر اساس ضخامت جداره محصول تولیدشده در پژوهشی [26] که به کشش عمیق ورق جهت تولید مخازن CNG می‌پردازد، مقدار ٥میلی‌متر است. طول لوله در فرایند شبیه‌سازی، فاصلهٔ بین سر آزاد لوله و گیره یا سه‌نظام نگهدارندهٔ لوله در فرایند عملی است. این طول در پژوهش حاضر ۲۹۰میلی‌متر است. ابعاد و ویژگی‌های غلتک می‌توانند در نتایج شبیه‌سازی نتایج مهمی را به‌دنبال داشته باشند. در پژوهش حاضر نوع مدل‌سازی و ابعاد غلتک با استفاده از پژوهش‌های مشابه انتخاب شده است.



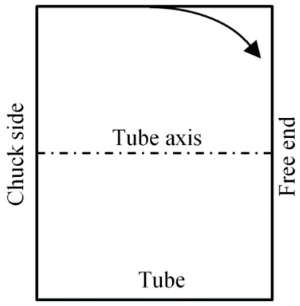
شکل ۳ هندسهٔ لوله

نوع غلتک مدل‌سازی‌شده جسم صلب تحلیلی (Analytical Rigid Body) است و شبکه‌بندی نمی‌شود. صلب درنظرگرفتن غلتک در پژوهش‌های [2,3,14,23,24] نیز انجام گرفته است.

قطر غلتک تقریبا ٤۰۰میلی‌متر است. این قطر بر اساس پژوهشی [29] که روی هندسهٔ غلتک در فرایند گنبدی‌کردن متمرکز بوده، انتخاب شده است. قطر لوله در پژوهش مذکور و پژوهش حاضر یکسان است. مقدار شعاع دماغه و زاویهٔ تماس غلتک (آلفا) نیز بر همین اساس به‌ترتیب ۱۸میلی‌متر و ۱۰درجه است. باتوجه‌به امکان اتصال غیرمطلوب بین لوله و غلتک، زاویهٔ رهایی غلتک بر اساس پژوهش ذوقی و همکاران [3] ۳۰درجه تعیین شده است. زاویهٔ رهایی با حرف بتا در شکل (٤) مشاهده می‌شود.



شکل ٤ غلتک

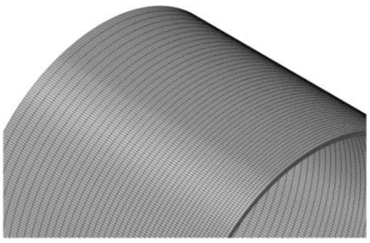


شکل ۵ جهت مسیرهای شکل‌دهی

در چینش اول یه، زاو یهٔ بین محور لو له و محور غلتک، جهت جلوگیری از برخورد نامطلوب و همچنین استفادهٔ بهتر از ناحیهٔ با شعاع ۱۸میلی‌متر، مقدار ۰ درجه ا ست. فا صلهٔ نقطهٔ تماس اولیهٔ غلتک از سر آزاد برای شبیه سازی گنبدی‌کردن کامل انتهای لوله، مقدار تقریبی ٥٤میلی‌متر است.

در پژوهش حاضر فرایند شکل‌دهی در ۸گذر که مسیر آن‌ها کمانی از دایره است، انجام می‌شود. مرکز این کمان‌ها محور لوله و جهت حرکت غلتک روی آن‌ها از سمت سر گیردار به‌سمت سر آزاد لوله است. شکل (٥) جهت مسیرهای شکل‌دهی در گذرهای مختلف را نشان می‌دهد. گام حرکت غلتک روی این مسیرها مقادیر ۷/۵میلی‌متر بر دور برای عمدهٔ فرایند و ۱/۵میلی‌متر بر دور برای قسمت پایانی شکل‌دهی است. سرعت دوران لوله، پس از بررسی‌های متعدد ۸۰۰دور بر دقیقه در نظر گرفته شده است. تماس بین غلتک و لوله باتوجه‌به تماس غلتشی این‌دو در فرایند عملی به‌صورت بدون اصطکاک در نظر گرفته شده است. در این مورد می‌توان به برخی پژوهش‌های انجام‌شده مانند [14,23,29-31] استناد کرد.

در شبکه‌بندی (Mesh) انجام‌شده جهت شبیه‌سازی کل فرایند، دو المان در راستای ضخامت لوله در نظر گرفته شده است. برای بررسی جزئی‌تر کرنش‌های به‌وجودآمده در لایه‌های مختلف که در ادامه به تفصیل دربارهٔ آن صحبت شده است، تعداد المان درنظرگرفته‌شده در راستای ضخامت لوله ٤ است. در هر ۲شکل شبکه‌بندی از المان توپر مکعبی (C3D8R) استفاده شده است. در حالتی که ۲ المان در ضخامت درنظرگرفته‌شده باشد، تعداد المان در محیط لوله ٤٤٨ و در طول لوله ٤٤، بنابراین تعداد کل المان‌ها ۱۹۷۱۲ عدد است. تعداد کل المان‌ها در حالت ٤ المان در ضخامت، ۳۹٤۲٤ خواهد بود. باتوجه‌به تغییر شکل بیشتر المان‌های نزدیک به سر آزاد لوله، این المان‌ها اندازهٔ طولی کوچک‌تری نسبت به المان‌های نزدیک به سر گیردار لوله دارند. شکل (٦) شبکه‌بندی انجام‌شده در لوله را نشان می‌دهد.



شکل ٦ شبکه‌بندی لوله

روابط حل. نوع تحلیل انجام‌شده در نرم‌افزار آباکوس، دینامیک صریح است. فرایند این حل بر مبنای انتگرال صریح است. انتگرال‌گیری از معادلات حرکت به‌صورت زیر انجام می‌شود [33]:

$$\boldsymbol{u}^{(i+1)} = \boldsymbol{u}^{(i)} + \Delta t^{(i+1)}\dot{\boldsymbol{u}}^{(i+\frac{1}{2})} \quad (۱)$$

$$\dot{\mathbf{u}}^{(i+\frac{1}{2})} = \dot{\mathbf{u}}^{(i-\frac{1}{2})} + \frac{\Delta t^{(i+1)} + \Delta t^{(i)}}{2}\ddot{\mathbf{u}}^{(i)} \quad (۲)$$

در روابط (۱ و۲)، $\dot{u}$ ماتریس سرعت و $\ddot{u}$ ماتریس شتاب است و شمارنده i، نمو را نشان می‌دهد. سرعت اولیه به‌صورت پیش‌فرض مقدار به‌دست‌آمده از رابطهٔ

(۳) در نظر گرفته می‌شود:

$$\dot{\boldsymbol{u}}^{(+\frac{1}{2})} = \dot{\boldsymbol{u}}^{(0)} + \frac{\Delta t^{(1)}}{2}\ddot{\boldsymbol{u}}^{(0)} \qquad (۳)$$

برای محا سبهٔ شتاب از رابطهٔ (٤) ا ستفاده می شود که در آن ماتریس جرم (M)، قطری ا ست و محا سبات را تسریع می‌کند:

$$\ddot{\boldsymbol{u}}^{(i)} = \boldsymbol{M}^{-1} \cdot (\boldsymbol{F}^{(i)} - \boldsymbol{I}^{(i)}) \qquad (٤)$$

موانع و راه‌حل‌ها. همان‌طور که در مقدمه ذکر شد، در زمینهٔ شبیه‌سازی گنبدی‌کردن انتهای لولهٔ آلومینیمی 6061-O با روش مورد استفاده در پژوهش حاضر هیچ مقاله‌ای یافت نشده است. از این رو، دستیابی به مقدار مناسب برای هر پارامتر یا مقداری که بتوان با آن شبیه‌سازی را به جلو برد، باتوجه‌به تعدد پارامترها و اثرات هر یک و همچنین تعدد مراحل شکل‌دهی، مهم‌ترین چالش پیش‌رو در پژوهش حاضر بوده است.

تعداد زیاد المان‌ها و زمان نسبتا طولانی انجام فرایند شکل‌دهی باعث افزایش زمان حل می‌شود، بنابراین در پژوهش حاضر از روش حل هم‌زمان جهت بالا بردن سرعت حل استفاده شده است. به این منظور ٤هستهٔ محاسباتی به کار گرفته شده‌اند.

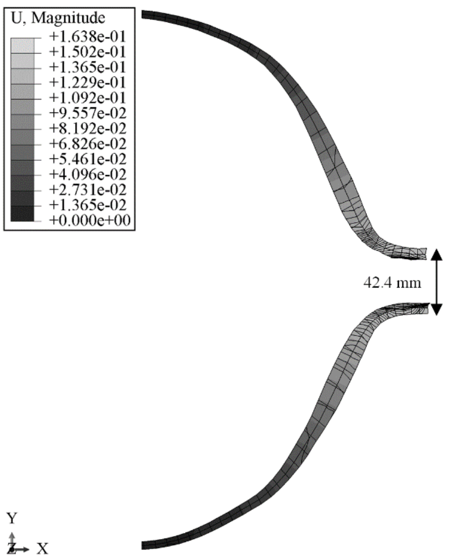
استفاده از تکنیک بزرگ‌نمایی جرم (Massscaling) راه‌حل دیگری برای کاهش زمان حل انجام شبیه‌سازی است. در پژوهش حاضر ضرایب بزرگ‌نمایی جرم بهینه‌سازی‌شده‌ای در شبیه‌سازی‌های کل فرایند شکل‌دهی از مقدار ۱ تا ٤ در نظر گرفته شده‌اند. اعمال بزرگ‌نمایی جرم می‌تواند اثرات نامطلوبی بر شکل گنبد حاصل داشته باشد [24]. بنابراین در پژوهش حاضر لوله ثابت است و غلتک با دوران خود گنبد را شکل می‌دهد.

ذوقی و همکاران [24] کارایی این روش را به نمایش گذاشته‌اند.

نتایج و بحث

با استفاده از روش و مقادیر پارامتر انتخاب‌شده، شبیه‌سازی نهایی صورت گرفت. شکل (۷) سطح مقطع گنبد به‌دست‌آمده را نشان می‌دهد. جهت بررسی اثر پارامترها در گذرهای مختلف شبیه‌سازی‌های مقطعی نیز انجام شده است. لازم به ذکر است که بر اساس شبیه‌سازی مشابه، با کاهش طول لوله از ۲۹۰ به ۲۵۰میلی‌متر می‌توان قطعهٔ نهایی با شکل بهتری را حاصل کرد.

نکته‌ای که در شکل (۷) باید مورد توجه قرار گیرد، شکل‌دهی سر (نافی) مخزن جهت نصب شیر روی مخزن است. به عبارت دیگر پارامترها و روش درنظرگرفته‌شده توانسته است به‌جای ایجاد یک گنبد کروی و بدون محل نصب شیر، به گنبدی دست یابد که در آن محل نصب شیر بدون انجام جوشکاری و به‌صورت یکپارچه وجود دارد. این مورد به‌نوعی فرایند ساخت یک مخزن بدون درز را تکمیل می‌کند.

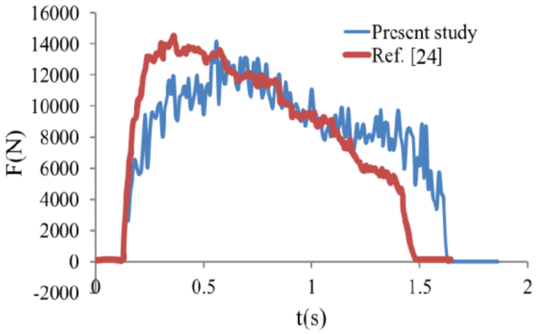


شکل ۷ سطح مقطع گنبد نهایی و توزیع جابه‌جایی (متر)

اعتبارسنجی. باتوجه‌به دراختیارنداشتن نتایج فرایند عملی گنبدی‌کردن انتهای لوله آلومینیمی، در پژوهش حاضر از پژوهش‌های مشابه جهت اعتبارسنجی استفاده شده و سعی شده است تا با انجام دوباره شبیه‌سازی صورت‌گرفته توسط دیگر پژوهشگران، «روش شبیه‌سازی» استفاده‌شده در پژوهش حاضر اعتبارسنجی شود. مشابه این روش اعتبارسنجی در [33] استفاده شده است. جهت اعتبارسنجی از این روش، داده‌های موجود در پژوهش ذوقی و همکاران [3, 24] انتخاب شده است. ایشان در پژوهشی به گنبدی‌کردن انتهای لوله فولادی (42CrMo) پرداخته‌اند.

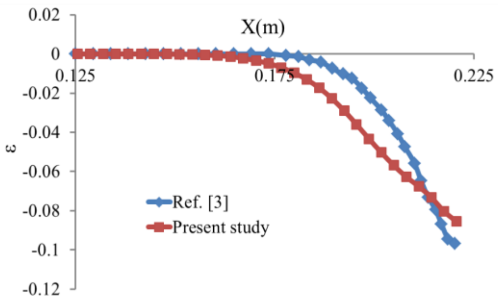
روی این مورد تأکید مجدد می‌شود که در اینجا نتایج گنبدی‌کردن یک لولهٔ آلومینیمی با نتایج گنبدی‌کردن یک لولهٔ فولادی مورد مقایسه قرار نگرفته‌اند. بلکه با تکرار شبیه‌سازی فرایند گنبدی‌کردن لولهٔ فولادی که در [3, 24] انجام شده است، نتایج به‌دست‌آمده با نتایج همان منابع مقایسه شده و از این طریق «اعتبار شبیه‌سازی» به کار گرفته شده در پژوهش حاضر ارزیابی شده است.

پارامتر اول مورد توجه برای مقایسه و اعتبارسنجی، پارامتر نیروی عکس‌العمل است. با تکرار شبیه‌سازی انجام‌شده توسط ذوقی و همکاران [١٥]، مقدار نیروی عکس‌العمل غلتک در گذر اول با گام ٢/٥میلی‌متر بر دور به دست آمده است. فاصلهٔ نقطهٔ تماس غلتک از سر آزاد لوله ٤٠میلی‌متر است. شکل (٨) کردار آمده در مقالهٔ ایشان و کردار به‌دست‌آمده در پژوهش حاضر را نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که با وجود اختلاف، روند کلی و مقادیر حداکثر به یکدیگر نزدیک هستند. مقدار خطا بین حداکثر نیروی عکس‌العمل در ٢پژوهش ٢/٨درصد است.



شکل ٨ مقایسهٔ مقدار نیروی عکس‌العمل غلتک در تکرار انجام‌شده به روش مورد استفاده در پژوهش حاضر و پژوهش ذوقی و همکاران [24]

پارامتر دیگر مورد توجه، پارامتر کرنش است. با تکرار شبیه‌سازی انجام‌گرفته توسط ذوقی و همکاران [3]، توزیع کرنش به‌دست‌آمده با توزیع کرنش گزارش‌شده در مقالهٔ ایشان مقایسه می‌شود. این کرنش‌ها در جدار داخلی لولهٔ تغییرشکل‌یافتهٔ حاصل از گذر اول خوانده شده است. شکل (٩) مقایسه مذکور را نشان می‌دهد. مقدار خطا در کرنش حداکثر، ١١/٧درصد است. محور طولی در شکل (٩)، فاصله از سر گیردار را نشان می‌دهد.



شکل ٩ مقایسهٔ توزیع کرنش محیطی در مسیر داخلی در تکرار انجام‌شده به روش مورد استفاده در پژوهش حاضر و پژوهش ذوقی و همکاران [3]

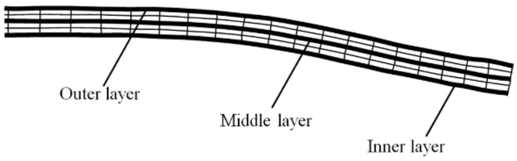
میزان اختلاف موجود در شکل‌های (٨ و ٩) می‌تواند به‌دلیل نقص اطلاعات در دسترس از شبیه‌سازی

ذوقی و همکاران [3, 24] باشد. طبیعی است که در این مقالات تمام داده‌ها و جزئیات مراحل متعدد شبیه‌سازی ذکر نشده باشد. از طرفی مقادیر نقاط کردارهای استخراج‌شده از این مقالات که در شکل‌های (۸ و ۹) آورده شده‌اند، از طریق روش دیجیتایز به دست آمده‌اند. در چنین شرایطی دستیابی به این سطح از تطابق می‌تواند تا حدود خوبی اعتبار شبیه‌سازی انجام‌شده در پژوهش حاضر را تأیید کند.

بررسی کرنش‌ها، تنش و اثر پارامتر گام. در این قسمت به بررسی دقیق‌تر گنبدی‌کردن انتهای لوله پرداخته می‌شود. در شبیه‌سازی‌هایی که نتایج آن‌ها در این قسمت بررسی می‌شود، به‌جای ۲المان در راستای ضخامت از ٤ المان استفاده شده است.

یکی از پارامترهایی که می‌تواند در راستای بررسی دقیق‌تر فرایند شکل‌دهی مورد توجه قرار گیرد، پارامتر گام است. این پارامتر به‌لحاظ اقتصادی نیز اهمیت دارد و هرچه گام بالاتر باشد، سرعت و بازده زمانی تولید افزایش می‌یابد.

در راستای بررسی دقیق‌تر فرایند گنبدی‌کردن انتهای لوله می‌توان اثر پارامتر گام شکل‌دهی را روی کرنش‌ها و تنش‌های به‌وجودآمده در نواحی مختلف بررسی کرد. انتخاب مقادیر مختلف برای این پارامتر می‌تواند روی کرنش‌های به‌دست‌آمده اثرگذاری کند. در این قسمت کرنش‌های محیطی، طولی و در راستای ضخامت لوله پس از انجام گذر اول، به‌ازای مقادیر مختلف گام مدنظر قرار گرفته‌اند. این کرنش‌ها از گره‌هایی در سطح مقطع طولی لوله در ۳مسیر داخلی (ε_i)، میانی (ε_m) و خارجی (ε_o) خوانده شده و در کردارهایی مورد بررسی قرار گرفته است. گره‌های مذکور تشکیل مسیرهایی را می‌دهند که بخشی از آن در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود. در شکل‌های مربوط به توزیع کرنش مبدأ مختصات روی محور لوله و در سر گیردار لوله قرار دارد.

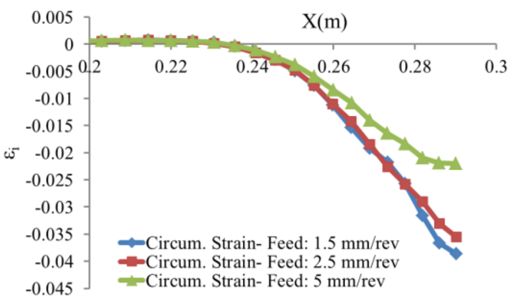


شکل ۱۰ مکان هندسی برداشت نتایج، خطهای ضخیم مسیرهایی هستند که کرنش‌های روی نقاط واقع در آن‌ها خوانده شده‌اند.

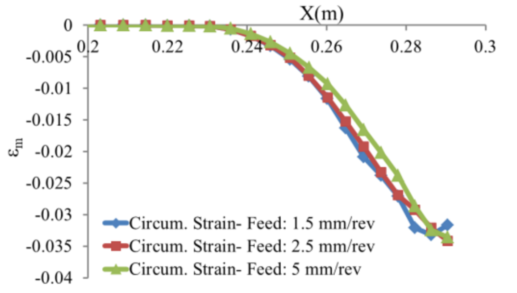
اثر پارامتر گام بر کل فرایند شکل‌دهی و همچنین اثر این پارامتر بر تنش های موجود در لو له پس از جداشدن غلتک در گذر اول نیز در این قسمت مورد توجه و بررسی قرار گرفته است.

بررسی کرنش محیطی و اثرات گام بر آن.

۱- تقریبا در تمامی کردارهای مربوط به کرنش محیطی (شکل ۱۳-۱۱)، شیب افزایش قدر مطلق کرنش با نزدیک‌شدن به سر آزاد لوله کم می‌شود و تغییرات گام در این مورد اثری ندارد. در تفسیر این کاهش مقدار صعود می‌توان گفت که در سر آزاد المان‌ها می‌توانند با آزادی بیشتری به‌جای آنکه الزاما در راستای محیطی به یکدیگر فشرده شوند، در راستای محوری نیز حرکت کنند. توجه به روند کرنش‌های در راستای محور لوله که در ادامه دربارهٔ آن‌ها بحث شده است، می‌تواند تأییدی بر این تفسیر باشد.

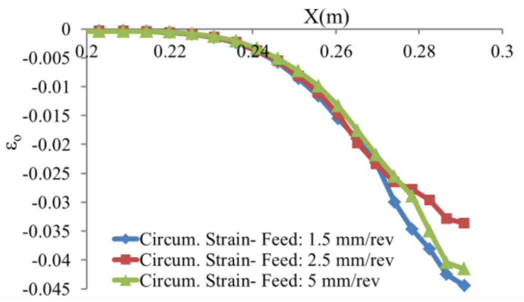


شکل ۱۱ کرنش محیطی در مسیر داخلی به‌ازای گام‌های ۱/۵، ۲/۵ و ۵ میلی‌متر بر دور



شکل ۱۲ کرنش محیطی در مسیر میانی به‌ازای گام‌های ۱/۵، ۲/۵ و ۵ میلی‌متر بر دور

۲- از شکل (۱۱) می‌توان این‌گونه برداشت کرد که در مسیر داخلی افزایش گام باعث کاهش قدر مطلق کرنش می‌شود. در مسیر میانی (شکل ۱۲) تغییر گام اثر مشابه و بسیار کمی بر تغییر کرنش گذاشته است. در مسیر خارجی و به‌طور مشخص در نواحی نزدیک به سر آزاد لوله این نظم حاکم نیست (شکل ۱۳). از این موارد می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که کرنش محیطی مستقل از تغییرات گام نیست و این نتیجه خلاف نتیجه‌ای است که ذوقی و همکاران در پژوهش خود [3] با استناد به کرنش در لایهٔ میانی گرفته‌اند.

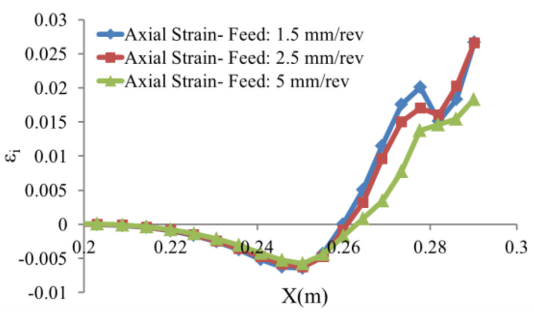


شکل ۱۳ کرنش محیطی در مسیر خارجی به‌ازای گام‌های ۱/۵، ۲/۵ و ۵ میلی‌متر بر دور

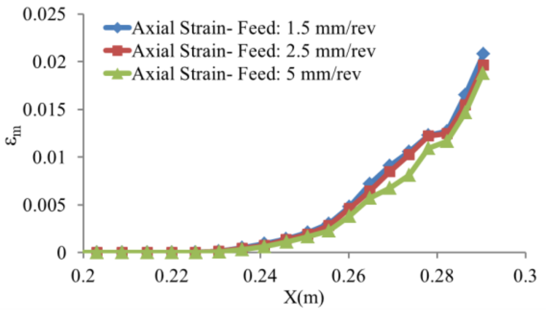
بررسی کرنش محوری و اثرات گام بر آن.

۱- شکل (۱٤) نشان می‌دهد که کرنش محوری در مسیر داخلی به‌شکل فشاری و کششی وجود دارد در حالی در شکل (۱۵) مشاهده می شود که در مسیر میانی عمده کرنش‌ها مثبت و کششی هستند و تغییرات گام اثر چندانی بر آن‌ها ندارد. فشردگی جدار داخلی لوله بر اثر خمش امری طبیعی است. اما این‌که چرا در ادامه مسیر داخلی به سمت سر آزاد، کرنش‌ها مثبت می‌شوند می‌تواند مربوط به امکان حرکت ماده به‌سمت سر آزاد بر اثر حرکت غلتک باشد. تغییرات گام بر این رفتار اثری ندارد.

۲- در شکل‌های (۱٤و ۱۵) در مجاورت سر آزاد ناحیه‌ای وجود دارد که در آن رشد کرنش کششی تقریبا متوقف یا منفی می‌شود. این پدیده نشان می‌دهد که حرکت غلتک خمش موضعی بیشتری را در سر آزاد به وجود می‌آورد. در توضیح دلیل این تفسیر باید به شکل‌های (۱٤ و ۱۵) توجه کرد. در همان ناحیه از مسیر داخلی که کرنش در کردار مربوط به گام ۱/۵ میلی‌متر بر دور در شکل (۱٤) کاهش می‌یابد، در شکل (۱۵) کرنش در کردار مربوط به گام ۱/۵میلی‌متر بر دور در مسیر میانی کاهش نمی‌یابد. این یکسان‌نبودن مقدار تغییر کرنش نشانگر خوبی از خمش موضعی است. افزایش گام باعث کاهش این خمش موضعی می‌شود.



شکل ۱٤ کرنش محوری در مسیر داخلی به‌ازای گام‌های ۱/۵، ۲/۵ و ۵ میلی‌متر بر دور



شکل ۱۵ کرنش محوری در مسیر میانی به‌ازای گام‌های ۱/۵، ۲/۵ و ۵ میلی‌متر بر دور

۳- در ناحیهٔ نزدیک به سر آزاد، شیب کردار کرنش افزایش می‌یابد و این موضوع می‌تواند باتوجه‌به نبود قید در سر آزاد که در پژوهش ذوقی و همکاران [3] نیز مورد توجه بوده است، رخ داده باشد که نتیجه همان مطلبی است که مورد اول از موارد مربوط به کرنش محیطی مطرح شد. اثر بیشترین گام در مسیر داخلی کاهش این شیب است.

۴- باتوجه‌به موارد ۲ و ۳ می‌توان نتیجه گرفت که اثر عمدهٔ افزایش گام بر کرنش محوری کاهش قدر مطلق کرنش و یکنواخت‌ترشدن کردار است. این کاهش تغییر شکل‌های ناگهانی می‌تواند علت اثر گام بر کل فرایند باشد که در ادامه و در بخش اثر گام در کل فرایند گنبدی‌کردن به آن پرداخته شده است.

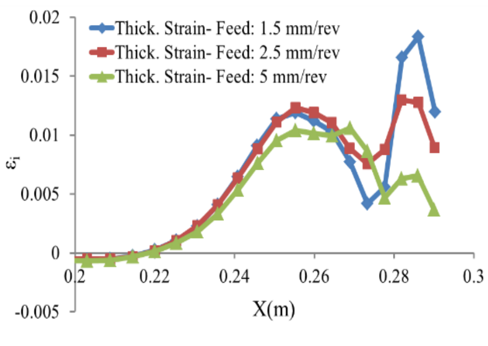
۵- افزایش کرنش محوری بر اثر کاهش گام که به‌شکل ویژه در شکل (۱۴) مشاهده می‌شود، در پژوهش [8] نیز نشان داده شده است. کار روی لولهٔ آلومینیمی و استفاده‌نکردن از ماندرل ۲وجه اشتراک مهم این پژوهش و پژوهش حاضر است.

بررسی کرنش درراستای ضخامت و اثرات گام‌بر آن.

۱- مقادیر کرنش مثبت در راستای ضخامت در شکل‌های (۱۶، ۱۷ و ۱۸) باتوجه‌به افزایش ضخامت گنبد (شکل ۷) امری طبیعی است. کرنش‌های منفی قابل توجه، فقط در مسیر خارجی و در سر آزاد که محل اعمال نیروی فشاری توسط غلتک و بیشترین کرنش محوری مثبت است وجود دارند. وجود بیشینه قبل از سر آزاد در شکل (۱۷ و ۱۸) و همچنین شکل (۱۹) مطابق تغییرات ضخامت در شکل (۷) است.

۲- با مقایسهٔ شکل (۱٤) و شکل (۱٦) می‌توان دریافت که در ناحیه‌ای که کرنش محوری در شکل (۱٤) در گام ۱/۵میلی‌متر بر دور دارای بیشینهٔ موضعی است، کردار مربوط به همین مقدار گام در شکل (۱٦) دارای کمینهٔ موضعی است. در نگاهی کلی‌تر می‌توان مشاهده کرد که روندهای افزایشی و کاهشی در این ۲کردار در نواحی مختلف عکس یکدیگر است. بنابراین می‌توان این‌گونه تفسیر کرد که متغیربودن میزان کشیدگی (کرنش محوری مثبت) باعث تغییرات در کرنش در راستای ضخامت شده است.

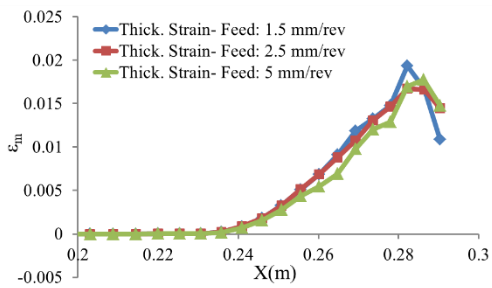
۳- در بیشتر نواحی، افزایش گام باعث کاهش قدر مطلق کرنش، کاهش تغییرات شدید مقادیر کرنش و اصطلاحا یکنواخت‌ترشدن کردارها در هر ۳مسیر می‌شود. از جهتی تغییر گام اثری بر روند کلی کردارها ندارد.



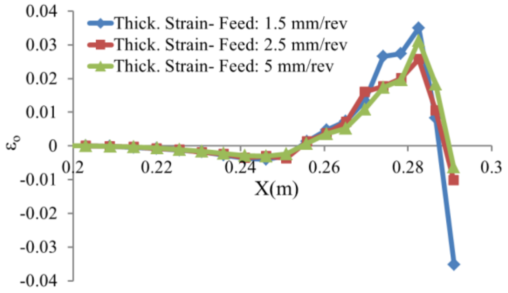
شکل ۱٦ کرنش در راستای ضخامت در مسیر داخلی به‌ازای گام‌های ۱/۵، ۲/۵ و ۵ میلی‌متر بر دور

٤- توجه به شکل (۱۷) نشان می‌دهد که دربارهٔ کرنش در راستای ضخامت لوله نیز افزایش گام اثر قابل توجهی بر مقدار کرنش‌های مسیر میانی نمی‌گذارد. این برداشت درباره کرنش‌های به‌دست‌آمده از مسیر خارجی که در شکل (۱۸) مشاهده می‌شود، دربارهٔ شکل کلی توزیع صحیح است. در این شکل یکنواخت‌ترشدن کردار بر اثر افزایش گام به‌وضوح مشخص است. تأثیرنگذاشتن گام در عمده مسیر میانی در پژوهش ذوقی و همکاران [3] نیز مشاهده شده است، با این تفاوت که در پژوهش ایشان در ناحیه‌ای بین سر آزاد و سر گیردار، افزایش گام باعث افزایش کرنش در راستای ضخامت در لایهٔ میانی شده است.

اثر گام در کل فرایند گنبدی‌کردن. با بررسی کرنش در جهات و نقاط مختلف مشاهده شد که اثر عمدهٔ افزایش گام، کاهش قدر مطلق مقدار کرنش است. شکل (۱۹) که کرنش معادل را در مسیر داخلی نشان می‌دهد به‌نوعی مؤید این گزاره است. کاهش کرنش بر اثر افزایش گام از نتایج پژوهش ژیونگ و همکاران [4] نیز بوده است.



شکل ۱۷ کرنش در راستای ضخامت در مسیر میانی به‌ازای گام‌های ۱/۵، ۲/۵ و ۵ میلی‌متر بر دور

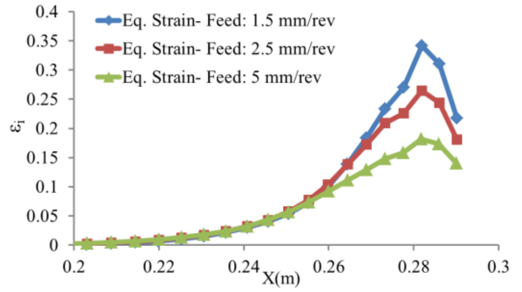


شکل ۱۸ کرنش در راستای ضخامت در مسیر خارجی به‌ازای گام‌های ۱/۵، ۲/۵ و ۵ میلی‌متر بر دور

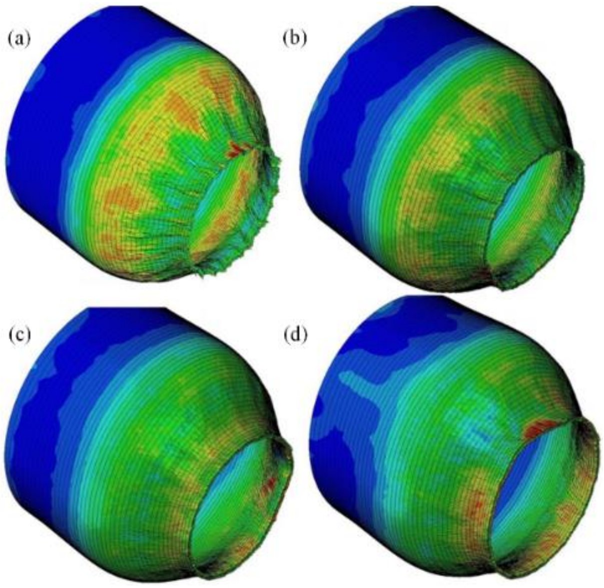
باتوجه‌به این نتیجه می‌توان اثر گام را در ادامهٔ فرایند شکل‌دهی بررسی کرد. یافته‌های پژوهش حاضر در شبیه‌سازی‌های مختلف نشان می‌دهد که بالارفتن گام به‌لحاظ پایداری کل فرایند شکل‌دهی نیز مفید است. در محدودهٔ مورد بررسی، هرچه گام بالاتر رود میزان اعوجاج و چروک به‌وجودآمده در گنبد شکل‌داده‌شده کمتر می‌شود. این نتیجه از آزمایش مقدار گام‌هایی در بازهٔ ۱ تا ۷/۵میلی‌متر بر دور به دست آمده است. شکل (۲۰) حاصل این آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. به‌عبارت دیگر می‌توان گفت که انجام فرایند گنبدی‌کردن لوله با گام شکل‌دهی نسبتا کم می‌تواند با افزایش کرنش‌های به‌وجودآمده، فرایند را با ناپایداری و توقف کامل روبه‌رو کند.

بررسی سطح مقطع گنبد درحال شکل‌گیری نیز می‌تواند اثر نامطلوب گام‌های پایین را به نمایش بگذارد. این موضوع در شکل (۲۱) مشاهده می‌شود. در این شکل در سطح مقطع‌هایی از لوله که با گام کمتر شکل‌دهی شده‌اند، کرنش یا به‌عبارتی تغییر شکل بیشتر و همچنین به‌هم‌ریختگی المان‌ها از همان اوایل انجام فرایند شکل‌دهی (پس از گام اول) مشهود است.

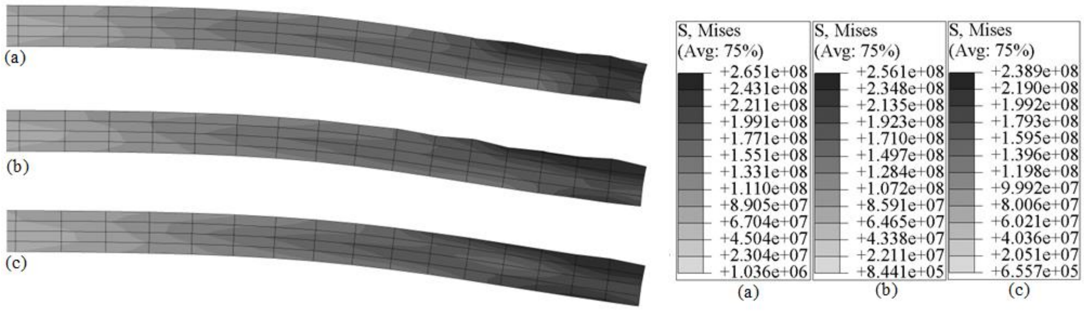
اثر گام بر تنش موجود پس از برداشتن بار. شکل (۲۱) تنش‌های موجود در سطح مقطع لوله را پس از گذشت ۰/۲ ثانیه از اتمام فرایند شکل‌دهی گذر اول و در حالتی که غلتک از لوله جدا شده است نشان می‌دهد. همان‌طور که از مقادیر حداکثر تنش به‌دست‌آمده مشخص است، افزایش گام باعث کاهش در این مقادیر شده است.



شکل ۱۹ کرنش معادل در مسیر داخلی به‌ازای گام‌های ۱/۵، ۲/۵ و ۵ میلی‌متر بر دور



شکل ۲۰ تأثیر مقدار گام بر میزان چروک و اعوجاجات به‌وجودآمده در پایان گذر ششم گنبدی‌کردن لوله، (a): گام= ۱ میلی‌متر بر دور، (b): گام= ۳ میلی‌متر بر دور، (c): گام= ٦ میلی‌متر بر دور، (d): گام= ۷/۵ میلی‌متر بر دور



شکل ۲۱ اثر گام بر توزیع تنش در سطح مقطع لوله پس از برداشتن بار: (a): گام= ۱/۵ میلی‌متر بر دور، (b) گام= ۲/۵ میلی‌متر بر دور و (c): گام= ۵ میلی‌متر بر دور. واحد تنش‌ها پاسکال است

نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از یک مدل المان محدود سه‌بعدی، مقادیر پارامتر و تکنیک‌های مختلف، فرایند گنبدی‌کردن انتهای یک لولهٔ آلومینیمی 6061-O شبیه‌سازی شد و اعتبار این شبیه‌سازی با استفاده از پژوهشی مشابه، ارزیابی شد. باتوجه‌به اهمیت این مخازن در کاهش مصرف سوخت، دستیابی به مقدار مناسب پارامترهایی که بتواند یکی از مراحل تولید را با پایداری کافی به پایان برساند، دستاوردی مهم است که در پژوهش حاضر به این پارامترها در حد شبیه‌سازی دست یافته شد. در راستای بررسی کلی اثر گام بر این فرایند، مشاهده شده است که کاهش مقدار گام می‌تواند در گنبد ساخته‌شده ایجاد چروک و اعوجاج کند. علاوه بر این نگاه کلی، بررسی دقیق‌تری روی اثر گام بر کرنش‌ها و همچنین بر تنش پس برداشتن بار با اتمام گذر اول انجام شده است. نتایج این بررسی به‌شکل زیر خلاصه می‌شود:

۱- با نزدیک شدن به سر آزاد، شیب افزایش قدر مطلق کرنش محیطی کم می‌شود و تغییرات گام در این مورد اثری ندارد. بر خلاف پژوهشی مشابه، مشاهده شد که میزان کرنش محیطی مستقل از پارامتر گام نیست.

۲- افزایش گام در وجود کرنش محوری مثبت در مسیر داخلی و میانی (با وجود خمش لوله) اثری ندارد، اما کردار کرنش محوری را یکنواخت‌تر می‌کند. بیشترین گام بررسی شده خمش موضعی و شیب افزایش کرنش محوری را در سر آزاد لوله کم می‌کند.

۳- تغییرات گام اثر قابل توجهی بر مقدار کرنش در راستای ضخامت در مسیر میانی ندارد. در مسیر داخلی شکل کلی توزیع کرنش را تغییر نمی‌دهد اما کردار توزیع را یکنواخت‌تر می‌کند.

٤- از نگاه کلی‌تر، اثر گام بر هر ۳کرنش محیطی، محوری و در راستای ضخامت در مسیر میانی ناچیز است.

۵- افزایش گام باعث یکنواخت‌ترشدن شکل گنبد می‌شود. این موضوع مطابق با یکنواخت‌ترشدن کردار در موارد فوق و همچنین یکنواخت‌ترشدن کردار کرنش معادل در مسیر داخلی است.

٦- با افزایش گام، حداکثر تنش مشاهده‌شده پس از جداشدن غلتک از لوله کاهش یافته است.

این موارد با بررسی گام در محدوده‌ای خاص به دست آمده‌اند. باتوجه‌به مطلوب‌بودن افزایش گام به‌لحاظ اقتصادی، اثر حدود بالاتر گام و همچنین انجام فرایند عملی می‌تواند موضوع پژوهش‌های بعدی باشد.

واژه نامه

گنبدی کردن (انتهای لوله)	Dome forming
گام	Feed
اسپینینگ برشی	Shear spinning
اسپینینگ معمولی	Conventional spinning
گذر	Pass
جسم صلب تحلیلی	Analytical Rigid Body
شبکه‌بندی	Mesh
بزرگ‌نمایی جرم	Mass scaling

مراجع

1. Lee K. O., Park G. Y., Kwak H. S., and Kim C., "Forming of Dome and Inlet Parts of a High Pressure CNG Vessel by the Hot Spinning Process", *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 40, pp. 887-894, (2016).
2. Huang C.-C., Hung J.-C., Hung C., and Lin C. R., "Finite element analysis on neck-spinning process of tube at elevated temperature", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 56, pp. 1039-1048, (2011).
3. Zoghi H., Arezoodar A. F., and Sayeaftabi M., "Effect of feed and roller contact start point on strain and residual stress distribution in dome forming of steel tube by spinning at an elevated temperature", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, Part B: *Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 226, pp. 1880-1890, (2012).
4. Xue Z., Ren Y., Luo W., and Ren Y., "Effect of Feed Speed on Aluminum Alloy Pipe Neck-Spinning Process and Deformation Analysis Via Simulation," *MATEC Web Conf.*, Vol. 67, No. 05011, (2016).
5. Lin Y.-C., Chen J. Y., He D. G., Li X. H., and Yang J., "Marginal-restraint mandrel-free spinning process for thin-walled ellipsoidal heads", *Advances in Manufacturing*, Vol. 8, pp.189-203, (2020).
6. Lin Y. C., Qian S. S., Chen X. M., Wang J. Q., Li X. H., and Yang H., "Influences of feed rate and wall thickness reduction on the microstructures of thin-walled Hastelloy C-276 cylindrical parts during staggered spinning", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 106, pp. 3809-3821, (2020).
7. Jianguo Y. and Makoto M., "Effects of indented feed of roller tool on parallel spinning of circular aluminum tube", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 128, pp. 274-279, (2002).
8. Jianguo Y. and Makoto M., "An experimental study on paraxial spinning of one tube end", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 128, pp. 324-329, (2002).
9. Jianguo Y. and Makoto M., "An experimental study on spinning of taper shape on tube end", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 166, pp. 405-410, (2005).
10. Chen M. D., Hsu R.-Q., and Fuh K.-H., "Effects of over-roll thickness on cone surface roughness in shear spinning", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 159, pp. 1-8, (2005).
11. Zhan M., Yang H., J. Zhang H., Y. Xu L., and Ma F., "3D FEM analysis of influence of roller feed rate on forming force and quality of cone spinning", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 187‑188, pp. 486-491, (2007).
12. Wang L., Long H., Ashley D., Roberts M., and White P., "Effects of the roller feed ratio on wrinkling failure in conventional spinning of a cylindrical cup", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 225,

pp. 1991-2006, (2011).
13. Jian Z., Shuang Z., Fengsheng L., Lei Z., and Ce-An G., "Numerical simulation and experiment of spinning forming of high strength aluminum alloy tubes", *University Politehnica of Bucharest Scientific Bulletin, Series B*, Vol. 80, pp. 227-238, (2018).
14. Roy B. K., Korkolis Y. P., Arai Y., Araki W., Iijima T., and Kouyama J., "Experiments and simulation of shape and thickness evolution in multi-pass tube spinning", *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1063, 012087, (2018).
۱۵. جلیلی ایرج، یوسفیان حسین، صدیقی محمد، کساییان مهدی، "ارائه حل تحلیلی در فرایند شکل دهی چرخشی مخروط های فلزی به روش های کار ایده آل و حد بالایی"، مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۸ (۸)، ص. ۵۵-۶۰، (۱۳۹۷).
16. Nakasato S., Kobayashi J., and Itoh G., "Hot spinning formability of aluminum alloy tube", *Procedia Manufacturing*, Vol. 15, pp. 1263-1269, (2018).
17. Roy B. K., Korkolis Y. P., Arai Y., Araki W., Iijima T., and Kouyama J., "Experimental and numerical investigation of deformation characteristics during tube spinning", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 110, pp. 1851-1867, (2020).
18. Roy B. K., Korkolis Y. P., Arai Y., Araki W., Iijima T., and Kouyamad J., "A study of forming of thin-walled hemispheres by mandrel-free spinning of commercially pure aluminum tubes", *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 64, pp. 306-322, (2021).
۱۹. صدیقی محمد، ناصری نژاد کمال‌الدین، "مدل‌سازی فرایند اسپینینگ مخازن آلومینیمی تحت فشار و بررسی پارامترهای مؤثر"، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۷ (۵٦)، ص. ۳۰۳-۳۱۲، (۱۳۹۸).
20. Zoghi H. and Arezoodar A. F., "Finite element study of stress and strain state during hot tube necking process", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 227, pp. 551-564, (2013).
21. Akkus N. and Kawahara M., "An experimental and analytical study on dome forming of seamless Al tube by spinning process", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 173, pp. 145-150, (2006).
22. Yoshihara S., Mac Donald B., Hasegawa T., Kawahara M., and Yamamoto H., "Design improvement of spin forming of magnesium alloy tubes using finite element", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 153-154, pp. 816-820, (2004).
23. Lexian H. and B. Dariani M., "An analytical contact model for finite element analysis of tube spinning process", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 222, pp. 1375-1385, (2008).
24. Zoghi H., Fallahi Arezoodar A., and Sayeaftabi M., "Enhanced finite element analysis of material deformation and strain distribution in spinning of 42CrMo steel tubes at elevated temperature", *Materials & Design*, Vol. 47, pp. 234-242, (2013).
۲۵. تارنمای اینترنتی گروه عابدی، دی ۱۳۹۸.

26. Sedighi M. and Rasti M., "An investigation on manufacturing process parameters of CNG pressure vessels", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 38, pp. 958-964, (2008).
27. Davis J. R., "Properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials", ASM International, (1990).
28. Mahabunphachai S. and Koç M., "Investigations on forming of aluminum 5052 and 6061 sheet alloys at warm temperatures", *Materials & Design (1980-2015)*, Vol. 31, pp. 2422-2434, (2010).
29. Lexian H. and Dariani B. M., "Effect of roller nose radius and release angle on the forming quality of a hot-spinning process using a non-linear finite element shell analysis", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 223, pp. 713-722, (2009).
30. Quigley E. and Monaghan J., "Enhanced finite element models of metal spinning", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 121, pp. 43-49, (2002).

۳۱. ح لکزیان، ب م داریانی، م زارع پور، م زینلی، ا حاج علی، "بررسی اثر شعاع دماغه و زاویه غلتک بر کیفیت فرمینگ در فرایند اسپینینگ لوله با استفاده از یک کد المان محدود غیر خطی"، IAS2009، اصفهان، (۱۳۸۷).

32. "Abaqus 2017 Documentation, Explicit dynamic analysis", Dassault Systemes.

۳۳. علی میرزالو ولی، عبدا... زاده گاوگانی میثم، احمدی سیروس، دنیوی علی، "بررسی عوامل مؤثر بر توزیع کرنش در فرایند شکل‌دهی غلتکی مقطع گرد با استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها"، نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ٤۹ (۲)، ص. ٤۱۳-٤۲۲، (۱۳۹٦).

Feed Effect on Strain and Stress in Dome Forming (Spinning) of a Tube in an Aluminum CNG Vessel Manufacturing

Mohamad Sedighi[1] Kamaleddin Naserinejad[2]

1. Introduction

A seamless pressure vessel can reveal a better quality compared with vessels which are fabricated using joints like weld. In one of the seamless pressure vessel manufacturing methods, a metallic sheet is deep drawn and a cup-shaped part is fabricated. Then, open end of this cup which can be considered as a tube, is shaped to a dome by a process which is called "dome forming" (Figure 1).

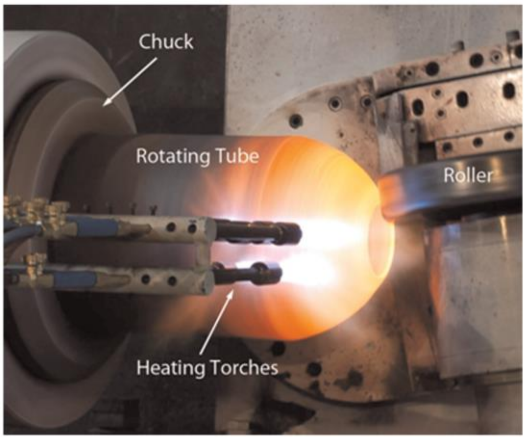


Figure 1. Dome forming process

One of the most important parameters of dome forming process is the feed parameter which is the amount of roller movement per each round of roller revolution. In this paper, dome forming of 6061-O aluminum alloy was simulated using Abaqus software. The final shape of the dome is presented and the feed effect on the developed strains after the first pass, on the whole of the process, and on the developed stress after the separation of the roller was investigated.

2. Simulation Inputs

The material properties of 6061-O aluminum alloy which is heated up to 200 ºC is introduced to the software and it was assumed that this temperature is kept constant by the heating torches. The tube diameter is 356 mm. It is the diameter of a vessel which is fabricated in the region (Figure 2). The roller nose radius, the α and β angles are 18 mm, 10º and 30º, respectively (Figure 3). The contact between the roller and the tube was considered frictionless due the rolling contact.

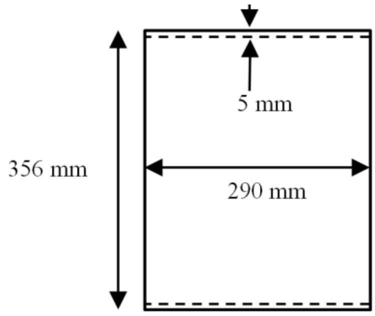


Figure 2. The tube geometry

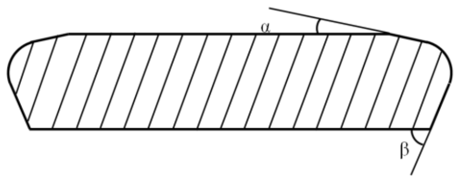


Figure 3. The roller

Two C3D8R elements are used in the tube thickness in the whole process modeling (totally 19712 elements). For more detailed strain investigation after the first pass, four elements were used in the tube thickness (totally 39424 elements). Finer mesh was used near the tube end. The dynamic explicit analysis was used in the simulation.

3. Results and Discussion

Figure 5 shows the final dome cross section. The simulation was validated. In order to have a more precise investigation on the dome forming process, the feed effect can be investigated in different locations. To this end, circumferential, longitudinal and thickness strains were investigated for different feed values and after the first pass. The strain values were obtained from a series of nodes which were placed in the outer, middle and inner paths on the tube cross section. The paths are shown in Figure 6.

[1] Professor, School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
[2] MSc. School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran. Corresponding Author, Email: k_naserinejad@alumni.iust.ac.ir

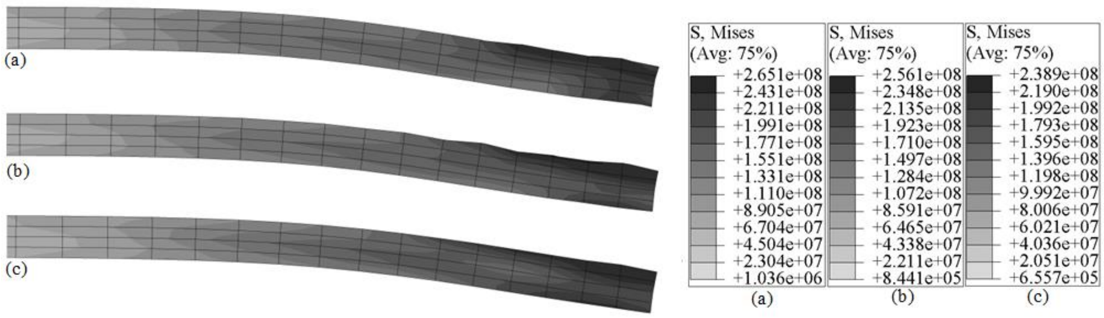


Figure 4. The feed effect on the stress distribution after the roller separation, the feed is increased from (a) to (c)

4. Conclusion

In the whole process view, it is seen that low feed values result in wrinkling of the dome.

The following results were achieved from strain and stress investigation after the first pass:

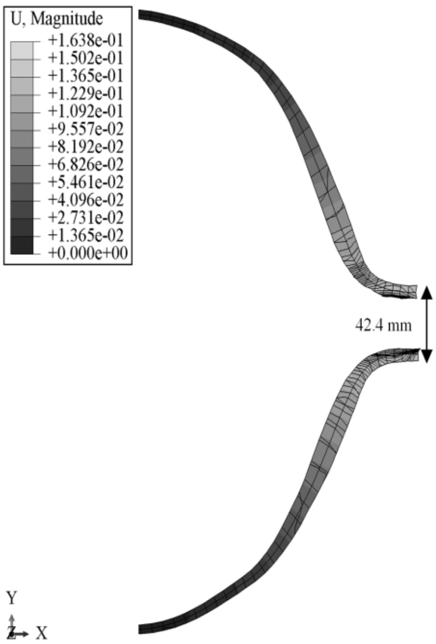


Figure 5. The final dome cross section and displacement distribution (m)

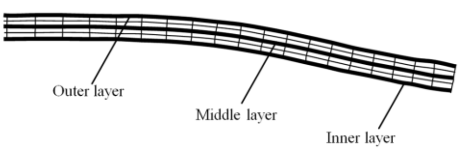


Figure 6. The paths from which the strains are obtained after the first path

1. The circumferential strain absolute value increase rate, decreases toward free end and the feed has no effect in this case. Unlike a similar study, it was seen that the circumferential strain is not independent from the feed.

2. The feed increase has no effect on positive longitudinal strain existence (although the tube is bent) in inner and middle layer, but it makes the longitudinal strain curve more uniform. The maximum tested feed value decreases the local bending and the longitudinal strain increase rate at the tube free end.

3. The feed variation has no significant effect on the thickness strain value in the middle layer. In the inner layer, it does not change the overall shape of strain distribution but makes it more uniform.

4. Overall, the feed effect on the circumferential, longitudinal and thickness strain in the middle layer is negligible.

5. The feed increase results in a more uniform equivalent strain distribution curve in the inner layer.

6. It was seen that the maximum stress after roller separation is decreased by higher feed values (Figure 6).